

Застосування методу аналізу розмірностей при моделюванні транспортерів машин для внесення твердих органічних добрив

Розглянуто методику складання критеріальних рівнянь при моделюванні транспортерів машин для внесення твердих органічних добрив. Запропоновано удосконалити існуючі критеріальні рівняння для продуктивності транспортерів.

теорія подібності, аналіз розмірностей, критеріальне рівняння, критерій подібності

Постановка проблеми

Проблема комплексної механізації внесення органічних добрив в Україні пов'язана з відсутністю належної техніки, яка є застарілою і представлена у своїй більшості причіпними розкидачами кузовного типу з горизонтально розташованими лопатевими валами: ПРТ-7А, ПРТ-11, ПРТ-16, РОУ-6 і розкидачами-валкоутворювачами типу РУН-15Б [2]. Недоліком таких розкидачів була і залишається достатньо висока нерівномірність внесення добрив за шириною захвату, що негативно впливає на урожайність рослин. І хоча в останні роки провідне вітчизняне підприємство – виробник техніки для внесення органічних добрив АТ „Ковельсьільмаш” почало замінювати на машинах власного виробництва горизонтально розташовані розкидальні барабани на вертикальні (РТД-5, МТО-7, МТО-12) [4], в Україні залишається величезний парк машин з класичною горизонтальною конструкцією робочих барабанів. Тому питання досліджень для удосконалення існуючих розкидачів та розробки нових машин з вертикально-розташованими барабанами залишається відкритим та потребує наукового вирішення.

Спільним для кузовних машин, що розглядаються, є те, що органічні добрива до їх розкидальних робочих органів подаються ланцюгово-планчастим транспортером, для обґрунтування оптимальних параметрів якого багато вчених зверталось до застосування методу фізичного моделювання. Суть його полягає в тому, що вивчення певних процесів або пристроїв замінюють їх дослідженнями на фізичних моделях. При цьому для виготовлення моделі та планування експерименту виникає проблема правильного забезпечення геометричної, кінематичної і динамічної подібності моделі та натурального предмету досліджень, а також подібності оброблюваного матеріалу. У цьому повідомленні зроблена спроба з'ясувати деякі з питань цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На теренах колишнього Радянського Союзу найбільший вклад у розробку кузовних машин для внесення твердих органічних добрив було зроблено російськими вченими, серед яких варто відзначити наукові надбання М.М. Марченка, Г.І. Лічмана та А.Є. Шебалкіна [2, 3]. У своїх працях вони використовували положення теорії подібності, зокрема при плануванні лабораторних досліджень на фізичних моделях застосовували метод аналізу розмірностей.

Для дослідження ланцюгово-планчатого транспортера вченими було складено критеріальне рівняння зв'язку для визначення його секундної подачі на основі змінних та їх розмірностей[2], що представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Позначення змінних та їх розмірностей при складанні рівняння зв'язку для продуктивності транспортера

№	Назва змінної	Позначення	Розмірність
1	Продуктивність транспортера	q_{ϕ}	M/T
2	Швидкість подачі добрив	v_t	L/T
3	Ширина кузова	b_k	L
4	Висота шару добрив, що подаються	H_{Π}	L
5	Довжина кузова	L_k	L
6	Крок розташування планок	t	L
7	Висота планок	h	L
8	Густина добрив	ρ_n	M/L^3
9	Кут внутрішнього тертя	φ	—
10	Сила тиску планки	P	M/L^3
11	Розмір частинок добрив	d	L
12	Прискорення сили тяжіння	g	L/T^2
13	Кут нахилу транспортера	α	—

На основі таблиці 1 дослідниками було запропоновано наступне критеріальне рівняння зв'язку для визначення секундної подачі:

$$q_{\phi} = f(v_t, b_k, H_{\Pi}, L_k, t, h, \rho_n, \varphi, P, d, g, \alpha). \quad (1)$$

Після відповідних перетворень критеріальне рівняння (1) було представлено в наступному вигляді:

$$\frac{q_{\phi}}{v_t b_k \rho_n^2} = f\left[\frac{P}{v_t^2 \rho_n}, \frac{b_k g}{v_t^2}, \frac{b_k g}{v_t^2}, \frac{H_{\Pi}}{b_k}, \frac{L_k}{b_k}, \frac{t}{b_k}, \frac{h}{b_k}, \frac{d}{b_k}, \alpha, \varphi\right]. \quad (2)$$

Далі було сказано, що лінійну швидкість транспортера моделі визначали за критерієм Фруда:

$$\left[\frac{v^2}{L_0 g}\right]_m = \left[\frac{v^2}{L_0 g}\right]_n, \quad (7)$$

де m – індекс моделі;

n – індекс натури.

Після відповідних перетворень було запропоновано наступне співвідношення між кінематичними параметрами роботи транспортера розкидача органічних добрив:

$$v_m = v_n K_L^{-1/2}, \quad (8)$$

де v_m – швидкість транспортера фізичної моделі машини, м/с;

v_n – швидкість транспортера натурального зразка машини, м/с;

K_L – геометричний масштаб подібності.

Для фізичної моделі машини ПТУ–4 було обґрунтовано значення $K_L = 2,5$ [2]. На основі досліджень проведених Шебалкіним А.Є. було обґрунтовано вибір матеріала – моделі, в якості якого прийнято торфокрошку вологістю 49...52 %, об'ємною масою 470...500 кг/м³ і розміром частинок 15...20 мм (не менше 70% об'єму).

Проте в раніше опублікованій праці А.Є. Шебалкіна [3] було запропоновано дещо інше рівняння для продуктивності транспортера:

$$Q = F(v_t, B, H_d, L, t_t, \rho, \varphi, \sigma_i, b, g, \alpha_t, h, a), \quad (9)$$

де Q – продуктивність транспортера;

v_t – швидкість подачі добрив;

B – ширина шару добрив, що подаються;

H_d – висота шару добрив, що подаються;

L – довжина кузова;

t_t – крок планок транспортера;

ρ – густина добрив;

φ – кут внутрішнього тертя;

σ_i – сила тиску планки;

b – розмір частинок добрив;

g – прискорення сили тяжіння;

α_t – кут нахилу транспортера;

h – висота планки транспортера;

a – ширина планки транспортера.

Рішення рівняння (9) представлено в наступному вигляді:

$$F\left(\frac{Q}{v_t B \rho}; \frac{\sigma_i}{v_t^2 \rho}; \frac{bg}{v_t^2}; \frac{H}{B}; \frac{h}{B}; \frac{t_t}{B}; \frac{b}{B}; \alpha_t; \varphi\right) = 0. \quad (10)$$

Аналіз наведених рівнянь (2) і (10) показав, що при їх складанні не були враховані такі важливі механіко-технологічні властивості твердих органічних добрив як коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя, кут природного укосу, дотичне напруження зсуву, напруження розриванню добрив та липкість.

У рівнянні (2) очевидно помилково двічі записаний комплекс $b_k g / v_t^2$, адже як видно з таблиці 1, кількість змінних $n = 13$, для розмірностей яких використано $k = 3$ основні одиниці: маса M , час T , довжина L . Тому на підставі π – теореми можна стверджувати, що кількість безрозмірних комбінацій має становити $n - k = 10$, тоді як в рівнянні (2) кількість безрозмірних комбінацій становить одинадцять, що на одну більше ніж має бути. Скоріше за все це технічна помилка, що полягає у включенні двічі одного й того ж комплексу $b_k g / v_t^2$.

У рівнянні (10) на підставі π – теореми кількість безрозмірних комбінацій повинна становити $n - k = 14 - 3 = 11$, у той час коли таких комбінацій лише 9, що явно вказує на помилку при його складанні.

Також варто зазначити, що відоме рівняння (2) насправді не є однорідним. Так для доведення цього підставимо у один з комплексів рівняння (2) замість його змінних основні розмірності з таблиці 1 та отримаємо:

$$\frac{P}{v_t^2 \rho_H} = \frac{M \cdot T^2 \cdot L^3}{L^3 \cdot L^2 \cdot M} = \frac{T^2}{L^2} \neq 1.$$

Очевидно, що помилка була допущена ще при позначенні розмірностей для сили тиску планки P , що в таблиці 1 записана як $[M/L^3]$, що відповідає $[кг/м^3]$. Тоді як відомо, що сила вимірюється в ньютонах $[H=кг·м/с^2]$, а розмірність її в основних одиницях становить $[M·L/T^2]$.

Щодо першого комплексу в рівнянні (2), то він також не є однорідним відносно розмірностей:

$$\frac{q_{\phi}}{v_{\tau} b_{\kappa} \rho_{\text{н}}^2} = \frac{M \cdot T \cdot L^6}{T \cdot L \cdot L \cdot M^2} = \frac{L^4}{M} \neq 1.$$

Постановка завдання досліджень

Оскільки аналіз результатів останніх досліджень показав, що існуючі критеріальні рівняння насправді не є однорідними відносно розмірностей, не задовольняють π – теорему і не враховують важливих технологічних властивостей органічних добрив, то завдання досліджень полягало в урахуванні і усуненні наведених вище недоліків при складанні удосконаленого критеріального рівняння продуктивності транспортера машини для внесення твердих органічних добрив.

Об'єкт та методика досліджень

Об'єктом досліджень є технологічний процес роботи ланцюгово-планчатого транспортера машини для внесення твердих органічних добрив. Для побудови критеріальних рівнянь його продуктивності використовували метод аналізу розмірностей.

Результати досліджень

Запишемо в таблицю 2 позначення змінних та їх розмірностей при складанні удосконаленого рівняння зв'язку для продуктивності транспортера.

Таблиця 2 – Позначення змінних та їх розмірностей при складанні рівняння зв'язку для продуктивності транспортера

№	Назва змінної	Позначення	Розмірність
1	Продуктивність транспортера	q_{ϕ}	M/T
2	Швидкість транспортера	v_{τ}	L/T
3	Ширина кузова	b_{κ}	L
4	Висота кузова	h_{κ}	L
5	Довжина кузова	l_{κ}	L
6	Висота планки	$h_{\text{п}}$	L
7	Довжина планки	$l_{\text{п}}$	L
8	Крок розташування планок	t	L
9	Кут нахилу транспортера	α	–
10	Розмір частинок добрив	d	L
11	Густина добрив	ρ	M/L^3
12	Коефіцієнт зовнішнього тертя	$f_{\text{з}}$	–
13	Коефіцієнт внутрішнього тертя	$f_{\text{в}}$	–
14	Дотичне напруження зсуву добрив	τ	$M/(L \cdot T^2)$

15	Напруження розривання добрив	σ_p	$M/(L \cdot T^2)$
16	Напруження стискання добрив	$\sigma_{ст}$	$M/(L \cdot T^2)$
17	Липкість добрив	L	$M/(L \cdot T^2)$
18	Кут природнього укусу добрив	φ	—
19	Прискорення сили тяжіння	g	L/T^2

Загальне рівняння залежності q_ϕ від змінних приведених в таблиці 2 буде наступним:

$$q_\phi = f(v_t, b_k, h_k, l_k, h_n, l_n, t, \alpha, d, \rho, f_z, f_b, \tau, \sigma_p, \sigma_{ст}, L, g, \varphi). \quad (11)$$

При чому, як видно з таблиці 2, кількість змінних $n = 19$, для розмірностей яких використано $k = 3$ основні одиниці: маса M , час T , довжина L .

Тому на підставі π – теореми можна стверджувати, що кількість безрозмірних комбінацій становитиме $n - k = 16$. Складемо ці комбінації, використовуючи метод запропонований Релеєм.

Представимо рівняння (11) як степеневий комплекс:

$$q_\phi = f(v_t^a, b_k^b, h_k^c, l_k^d, h_n^e, l_n^f, t^g, \alpha^h, d^i, \rho^k, f_z^j, f_b^m, \tau^n, \sigma_p^p, \sigma_{ст}^q, L^r, g^s, \varphi^t). \quad (12)$$

Підставимо в рівняння (12) замість змінних їх розмірності з таблиці 2:

$$\frac{M}{L} = f\left(\left(\frac{L}{T}\right)^a, L^b, L^c, L^d, L^e, L^f, L^g, \alpha^h, L^i, \left(\frac{M}{L^3}\right)^k, f_z^j, f_b^m, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^n, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^p, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^q, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^r, \left(\frac{L}{T^2}\right)^s, \varphi^t\right). \quad (13)$$

Для однорідності рівняння (13) відносно розмірностей знайдемо співвідношення між показниками степенів:

для M : $1 = k + n + q + r$;

для T : $0 = a + b + c + d + e + f + g + i - 3k - n - p - q$;

для L : $-1 = -a - 2n - 2p - 2q - 2r - 2s$.

Спростимо ці рівняння шляхом виключення з них k, i та a . Тоді:

$k = 1 - n - q - r$;

$i = 2 + 2s - b - c - d - e - f - g$;

$a = 1 - 2n - 2p - 2q - 2r - 2s$.

Підставивши ці співвідношення в рівняння (13) отримаємо:

$$\frac{M}{L} = f\left(\left(\frac{L}{T}\right)^{1-2n-2p-2q-2r-2s}, L^b, L^c, L^d, L^e, L^f, \alpha^h, L^{2+2s-b-c-d-e-f-g}, \left(\frac{M}{L^3}\right)^{1-n-p-q-r}, f_z^j, f_b^m, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^n, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^p, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^q, \left(\frac{M}{L \cdot T^2}\right)^r, \left(\frac{L}{T^2}\right)^s, \varphi^t\right). \quad (14)$$

Об'єднавши члени рівняння (14) з однаковими показниками степенів отримаємо шукані безрозмірні комбінації:

$$\frac{q_{\phi}}{v_{\tau} d^2 \rho} = f \left(\left(\frac{b_k}{d} \right)^b ; \left(\frac{h_k}{d} \right)^c ; \left(\frac{l_k}{d} \right)^d ; \left(\frac{h_n}{d} \right)^e ; \left(\frac{l_n}{d} \right)^f ; \left(\frac{t}{d} \right)^g ; \alpha^h, f_z^j, f_b^m, \right. \\ \left. \left(\frac{\tau}{v_{\tau}^2 \rho} \right)^n ; \left(\frac{\sigma_p}{v_{\tau}^2 \rho} \right)^p ; \left(\frac{\sigma_{ст}}{v_{\tau}^2 \rho} \right)^q ; \left(\frac{L}{v_{\tau}^2 \rho} \right)^r ; \left(\frac{gd^2}{v_{\tau}^2} \right)^s ; \varphi^t \right). \quad (15)$$

Отримані рівняння задовольняють π – теорему, тому що отримано шістнадцять безрозмірних комбінацій, як і зазначалося вище.

При знаходженні формул переходу для побудови модельного процесу, визначаємо швидкість транспортера фізичної моделі, виходячи з безрозмірного комплексу, що входить в рівняння (15):

$$\left[\frac{gd^2}{v_{\tau}^2} \right]_M = \left[\frac{gd^2}{v_{\tau}^2} \right]_H. \quad (16)$$

Після відповідних перетворень отримаємо:

$$v_{\tau M} = \sqrt{\frac{d_M^2}{d_H^2} v_{\tau H}^2} = \sqrt{\frac{1}{K_L^2} v_{\tau H}^2} = v_{\tau H} \frac{1}{K_L}. \quad (17)$$

Слід відмітити, що хоча формула (17) і аналогічна відомій (8), проте її цінність полягає в тому, що вона отримана в результаті урахування механіко-технологічних властивостей добрив та недоліків при складанні самого критеріального рівняння (2).

Висновки

Отримано удосконалене критеріальне рівняння продуктивності транспортера машини для внесення органічних добрив та формулу переходу для побудови модельного процесу, що дозволяє визначити швидкість транспортера фізичної моделі при плануванні експериментальних досліджень.

Перспективи подальших розвідок будуть полягати у виготовленні лабораторної установки – фізичної моделі розкидача органічних добрив, реалізації повнофакторного експерименту та обґрунтуванні оптимальних конструктивних і кінематичних параметрів та уточненні в польових умовах.

Список літератури

1. Кирпичев М.В. Теория подобия. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 94 с.
2. Марченко Н.М., Личман Г.И., Шебалкин А.Е. Механизация внесения органических удобрений. – М.: ВО «Агропромиздат», 1990. – 207 с.
3. Шебалкин А.Е. Выбор типа и обоснование параметров дозирующих и распределяющих устройств большегрузных машин для внесения твердых органических удобрений: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1986. – 15 с.
4. Ясенецький В.Р. Розкидачі органічних добрив // Пропозиція. – 2002, № 4. – С. 104 – 108.

Рассмотрено методику составления критериальных уравнений при моделировании транспортеров машин для внесения твердых органических удобрений. Предложено усовершенствовать существующие критериальные уравнения для производительности транспортеров.

It is considered a technique of compiling of the criteria equations at simulation of conveyors of machines for applying solid organic fertilizers. It is offered to improve the existing criteria equations for productivity of conveyors.